

**Висновки.** Запропоновано спрощену математичну модель вібраційного гідроприводу пресування твердих побутових відходів з використанням генератора імпульсів тиску диференціальної дії, що дозволила отримати аналітичні залежності частоти та амплітуди від основних параметрів вказаного приводу, які можуть бути використані для виконання попередніх проектних розрахунків його параметрів.

**Список літератури:** 1. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 2004 року № 265 "Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами". 2. *Обертюх Р.Р., Іскович-Лотоцький Р.Д.* Генератори імпульсів тиску – основна ланка гідроімпульсного приводу // Вісник ВПІ. 1995. – № 1. – С. 42 – 47. 3. *Березюк О.В., Сторожук С.Б., Коц І.В.* Математичне моделювання вібраційного гідроприводу плити пресування твердих побутових відходів // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2006. – № 40. – С. 20 – 25.

*Поступила в редколегію 11.09.08*

УДК 666.91:621.351

**В.И. ВИННИЧЕНКО**, докт. техн. наук, **В.В. КОТЛЯРЕНКО**, аспірант,  
**А.В. БАБИНЦЕВ**, аспірант, ХГТУСА

### **СКОРОСТЬ ВИТАНИЯ ЧАСТИЦ И КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ДЕГИДРАТАЦИИ ГИПСА**

У статті проводиться огляд існуючих формул швидкості витання часточок матеріалу. Вказано найбільш доцільні для використання формули при дегідратації гіпсу в потоці теплоносія. Визначено коефіцієнт, який дозволяє розраховувати мінімально необхідну швидкість газового потоку для підйому і транспортування гіпсових часточок в установці для дегідратації

In article the review of existing formulas for definition of speed of sedimentation of particles of a material is spent. The most rational formulas for use are specified at dehydration of gypsum in a stream of the heat carrier. The factor is determined, allowing to calculate minimally necessary speed of a gas stream for transportations of gypsum particles in installation for dehydration

Исследователям пока еще не удалось разработать единой формулы для скорости витания частиц пыли. Сложность разработки такой формулы состо-

ит в том, что размеры частиц очень малы и на их движение влияют вместе с гравитационной силой еще и такие факторы, как броуновское движение, электростатические явления и форма частиц. Для определения скорости витания пылевых частиц могут применяться разные формулы в зависимости от величины частиц. Сложно также строго разграничить области применения той или иной формулы. Для некоторых размеров частиц разные формулы совпадают [1, 2].

Рассмотрим существующие подходы к теоретическому определению скорости витания и наиболее известные зависимости, с помощью которых можно определить скорость витания частиц материала в восходящем потоке теплоносителя в установке.

Как известно, условие витания частицы материала в восходящем потоке идентично условию равномерного осаждения частицы в неподвижной среде.

При движении частицы материала в неподвижной газовой среде под действием собственного веса уравнение движения частицы будет иметь вид:

$$Q_{\text{ч}} - N_{\text{А}} - O = \frac{Q_{\text{ч}}}{g} a, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ч}}$  – вес частицы;  $N_{\text{А}}$  – архимедова сила;  $O$  – сила сопротивления газовой среды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $a$  – ускорение движения частицы.

Характеристическим размером частицы материала является диаметр эквивалентного шара  $d$ . Вес частицы равен

$$Q_{\text{ч}} = \frac{\rho d^3}{6} r_{\text{м}} g,$$

где  $r_{\text{м}}$  – плотность материала.

Архимедова сила равна весу газа в объёме частицы, то есть

$$N_{\text{А}} = \frac{\rho_{\text{г}} d^3}{6} r_{\text{г}} g,$$

где  $r_{\text{г}}$  – плотность газовой среды.

Сила сопротивления:

$$O = x F_{\text{ч}} \frac{u^2}{2} r_{\text{г}},$$

где  $x$  – коэффициент сопротивления;  $F_{\text{ч}}$  – аэродинамическое сечение частицы;  $u$  – скорость частицы относительно газовой среды (относительная скорость газового потока, то есть скорость обтекания частицы потоком).

Аэродинамическое сечение частицы:

$$F_{\text{ч}} = \frac{pd^2}{4}.$$

Сначала частица падает ускоренно, но по мере возрастания скорости сила сопротивления среды увеличивается до тех пор, пока не наступит равновесие с силой тяжести. Дальнейшее падение будет проходить с постоянной скоростью, когда  $a = 0$ .

Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{pd^3}{6} g(r_{\text{м}} - r_{\text{г}}) - x \frac{pd^2}{4} \cdot \frac{u^2}{2} r_{\text{г}} = 0.$$

Отсюда равномерная скорость частицы в неподвижной газовой среде (скорость осаждения)

$$u = 2 \sqrt{\frac{gd(r_{\text{м}} - r_{\text{г}})}{3xr_{\text{г}}}}. \quad (2)$$

Эта скорость по абсолютному значению равна скорости обтекания частицы в неподвижной газовой среде, то есть скорости газовой среды относительно частицы.

Коэффициент сопротивления  $x$  зависит от критерия Рейнольдса  $Re$ . Как известно, для трёх режимов обтекания частицы газовой средой, зависимость  $x$  от  $Re$  следующая [3]:

для ламинарного режима ( $Re < 2$ ):

$$x = \frac{24}{Re}; \quad (3)$$

для переходного режима ( $2 \leq Re \leq 500$ ):

$$x = \frac{18,5}{Re^{0,6}}; \quad (4)$$

для автомодельного режима ( $500 < Re < 200000$ ):

$$x = 0,44. \quad (5)$$

Критерий Рейнольдса при обтекании частицы газом равен:

$$Re = \frac{u d r_{\Gamma}}{m}, \quad (6)$$

где  $u$  – скорость обтекания;  $m$  – динамическая вязкость газовой среды.

При движении частицы материала в восходящем потоке газа условием её витания является равенство скорости осаждения частицы и скорости газового потока.

Подставляя в уравнение (2) для каждого режима обтекания соответственно выражения (3), (4), (5) и учитывая зависимость (6), получим формулы скорости витания:

для ламинарного режима:

$$u = \frac{d^2 g (r_m - r_{\Gamma})}{18m}; \quad (7)$$

для переходного режима:

$$u \approx 0,153 \frac{g^{0,714} d^{1,143} (r_m - r_{\Gamma})^{0,714}}{m^{0,429} r_{\Gamma}^{0,286}}; \quad (8)$$

для автомодельного режима:

$$u \approx 1,741 \sqrt{\frac{gd(r_m - r_r)}{r_r}}. \quad (9)$$

Из зависимости (6) скорость витания равна:

$$u = \frac{Re \, m}{dr_r}. \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (7), (8), (9) вместо скорости витания её выражение (10) и принимая соответствующие значения критерия Рейнольдса для каждого режима обтекания, получим область нахождения эквивалентного диаметра частиц материала для каждого режима движения частицы в газе.

Для ламинарного режима:

$$d < \sqrt[3]{\frac{36m^2}{gr_r(r_m - r_r)}}; \quad (11)$$

для переходного режима:

$$\sqrt[3]{\frac{36m^2}{gr_r(r_m - r_r)}} < d \leq 43,640 \frac{m^{0,667}}{g^{0,333}(r_r(r_m - r_r))^{0,333}}; \quad (12)$$

для автомодельного режима:

$$43,640 \frac{m^{0,667}}{g^{0,333}(r_r(r_m - r_r))^{0,333}} < d < 2363,415 \sqrt[3]{\frac{m^2}{gr_r(r_m - r_r)}}. \quad (13)$$

При температуре теплоносителя (воздуха) на входе в рабочую зону установки  $400^\circ\text{C}$  и плотности гипсового сырья  $r_m = 2300 \text{ кг/м}^3$  имеем:

для ламинарного режима:

$$d < 1,492 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

для переходного режима:

$$1,492 \cdot 10^{-4} \text{ м} < d \leq 1,972 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

для автомоделного режима:

$$1,972 \cdot 10^{-3} \text{ м} < d < 0,107 \text{ м}.$$

Выше рассматривалось движение частицы материала в газовой среде без влияния на движение частицы соударения с другими частицами материала (когда порозность  $e = 1$ ). Здесь под порозностью понимаем выражение:

$$e = \frac{V_{\Gamma}}{V_{\Gamma} + V_{\text{м}}}, \quad (14)$$

где  $V_{\Gamma}$  – объём в зернистом слое, занятый газом;  $V_{\text{м}}$  – объём в зернистом слое, занятый частицами материала.

В режиме пневмотранспорта такое предположение допускается.

Подставим в формулу (14) вместо  $V_{\text{м}}$  отношение  $\frac{m_{\text{м}}}{r_{\text{м}}}$ , где  $m_{\text{м}}$  – масса частиц материала в слое. После преобразования имеем:

$$e = \frac{r_{\text{м}} g_1}{r_{\text{м}} g_1 + 1}, \quad (15)$$

$$\text{где } g_1 = \frac{V_{\Gamma}}{m_{\text{м}}}.$$

Значение параметра  $g_1$  определяется из уравнения теплового баланса установившегося.

Однако, если концентрация частиц материала в потоке теплоносителя значительная, порозность  $e < 1$ , то последнюю надо учитывать при расчёте скорости витания.

Известна интерполяционная зависимость для всех режимов обтекания частиц газом, полученная обобщением опытных данных при  $0,4 < e < 1$  [3]:

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar} e^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{\text{Ar} e^{4,75}}}, \quad (16)$$

где  $\text{Ar}$  – критерий Архимеда, который равен:

$$Ar = \frac{d^3 g r_{\Gamma} (r_M - r_{\Gamma})}{m^2}. \quad (17)$$

Подставляя в формулу (10) вместо критерия Рейнольдса его выражение через критерий Архимеда (16) и учитывая выражения (17) и (15), получим формулу скорости витания для всех режимов обтекания частиц материала газом (с учётом порозности):

$$u = \frac{d^2 g r_M^{4,75} (r_M - r_{\Gamma}) g_1^{4,75}}{18m(r_M g_1 + 1)^{4,75} + 0,6 \sqrt{d^3 g r_{\Gamma} r_M^{4,75} (r_M - r_{\Gamma}) g_1^{4,75} (r_M g_1 + 1)^{4,75}}}. \quad (18)$$

Альтшуль, Животовский и Иванов [4] приводят аппроксимированную приблизительную зависимость  $Re=f(Ar)$  для сферических частиц при любом режиме обтекания, которая имеет хорошее практическое подтверждение:

$$Re = -27,27 + \sqrt{27,27^2 + 3,03 A r e^{4,75}}. \quad (19)$$

Рассчитывая скорость витания с помощью выражений (10), (19), (17) и (15), получим:

$$u = \frac{-27,27m + \sqrt{(27,27m)^2 + \frac{3,03 d^3 g r_{\Gamma} r_M^{4,75} (r_M - r_{\Gamma}) g_1^{4,75}}{(r_M g_1 + 1)^{4,75}}}}{d r_{\Gamma}}. \quad (20)$$

При порозности в пределах  $0,4 < e < 0,6$  движение частиц материала в восходящем потоке теплоносителя подобно движению в псевдоожиженном состоянии, так как в последнем случае порозность обычно находится в таких же пределах. Поэтому скорость витания частиц при такой порозности можно отождествить со скоростью псевдоожижения.

Ахундов, Петрихина, Полинковская, Пржецлавский [5] приводят следующие зависимости для критерия Рейнольдса при псевдоожижении:

$$Re = 0,101 (Ar(1 - e))^{0,714}; \quad (21)$$

$$Re^{1,56} = \frac{2}{130} Ar e^{1,56} \left( \frac{d_{\max}}{d} \right)^{0,6}; \quad (22)$$

$$Re = 0,095 Fe^{1,56}, \quad (23)$$

где  $Fe$  – критерий Фёдорова, который равен [6]:

$$Fe = d \cdot \sqrt[3]{\frac{4 \cdot g \cdot r_{\Gamma} (r_{\text{м}} - r_{\Gamma})}{3 \cdot m^2}}. \quad (24)$$

По зависимости (21) скорость псевдоожижения (или витания при  $0,4 < e < 0,6$ ) равна:

$$u = \frac{0,101 d^{1,142} g^{0,714} (r_{\text{м}} - r_{\Gamma})^{0,714}}{m^{0,428} r_{\Gamma}^{0,286} (r_{\text{м}} g_1 + 1)^{0,714}}. \quad (25)$$

По зависимости (22) скорость псевдоожижения (витания) равна:

$$u \approx \frac{0,069 d^{0,538} d_{\max}^{0,385} g^{0,641} r_{\text{м}} (r_{\text{м}} - r_{\Gamma})^{0,641} g_1}{m^{0,282} r_{\Gamma}^{0,359} (r_{\text{м}} g_1 + 1)}. \quad (26)$$

По зависимости (23) скорость псевдоожижения (витания) равна:

$$u \approx \frac{0,11 g^{0,52} d^{0,56} (r_{\text{м}} - r_{\Gamma})^{0,52}}{m^{0,04} r_{\Gamma}^{0,48}}. \quad (27)$$

Дэвидсоном и Харрисоном [7] выводится следующая формула скорости псевдоожижения при  $e = 0,476$ :

$$u = 0,00114 g d^2 (r_{\text{м}} - r_{\Gamma}) / m. \quad (28)$$

Распространённым [6, 8, 9] является метод определения скорости витания с помощью критерия Лященко  $Ly$ :

$$u = \sqrt[3]{\frac{Ly \cdot m \cdot r_{\text{м}} \cdot g}{r_{\Gamma}^2}}. \quad (29)$$



Критерий Лященко определяется по графической зависимости от критерия Архимеда.

Рассмотренные формулы скорости витания сведены в табл. 1. Значения рассчитаны при следующих параметрах: эквивалентный диаметр гипсовых частиц  $d = 0,0002$  м,  $d_{\max} = 0,0003$  м, температура воздуха  $400$  °С, количество теплоносителя, расходуемое на единицу массы полугидрата сульфата кальция  $g_1 = 4,437$  м<sup>3</sup>/кг (найденно из уравнения теплового баланса установки).

Из табл. 1 видно, что формулы с номерами 1, 2 и 8 дают довольно близкие между собой значения. В то время как другие формулы дают значительно больший разброс значений.

Таблица 1

Формулы скорости витания частиц материала на входе в рабочую зону установки и соответствующие рассчитанные значения

Номер	Формула	Значение, м/с
1	$u \approx 0,153 \frac{g^{0,714} d^{1,143} (r_m - r_r)^{0,714}}{m^{0,429} r_r^{0,286}}$	1,168
2	$u = \frac{d^2 g r_m^{4,75} (r_m - r_r) g_1^{4,75}}{18 m (r_m g_1 + 1)^{4,75} + 0,6 \sqrt{d^3 g r_r^{4,75} (r_m - r_r) g_1^{4,75} (r_m g_1 + 1)^{4,75}}}$	1,157
3	$u = \frac{-27,27 m + \sqrt{(27,27 m)^2 + \frac{3,03 d^3 g r_r^{4,75} (r_m - r_r) g_1^{4,75}}{(r_m g_1 + 1)^{4,75}}}}{d r_r}$	1,402
4	$u = \frac{0,101 d^{1,142} g^{0,714} (r_m - r_r)^{0,714}}{m^{0,428} r_r^{0,286} (r_m g_1 + 1)^{0,714}}$	$1,057 \cdot 10^{-3}$
5	$u \approx \frac{0,069 d^{0,538} d_{\max}^{0,385} g^{0,641} r_m (r_m - r_r)^{0,641} g_1}{m^{0,282} r_r^{0,359} (r_m g_1 + 1)}$	0,444
6	$u \approx \frac{0,11 g^{0,52} d^{0,56} (r_m - r_r)^{0,52}}{m^{0,04} r_r^{0,48}}$	0,353
7	$u = 0,00114 g d^2 (r_m - r_r) / m$	0,031
8	$u = \sqrt[3]{\frac{L y \cdot m \cdot r_m \cdot g}{r_r^2}}$	1,142

Поэтому при близких ко взятым для расчета параметрах материала и теплоносителя скорость витания частиц лучше определять по формулам номер

1, 2 и 8 (табл. 1). Как видим, в формулах 1 и 8, в отличие от формулы 2, не учтена удельная затрата теплоносителя на единицу продукта ( $g_1$ ). Но по сравнению с формулой 2 формулы 1 и 8 более просты.

Скорость витания частиц и скорость газового потока связаны зависимостью:

$$u_z = u_g \cdot k, \quad (30)$$

где  $u_g$  – скорость газового потока;  $u_z$  – скорость витания частиц;  $k$  – коэффициент запаса.

Значение коэффициента запаса  $k$  зависит от размера наибольших частиц материала и условий транспортирования материала газовым потоком [6, 10, 11]. По мнению разных авторов значение коэффициента запаса следует принимать в интервалах: 1,3 ... 1,5 [6]; 1,5 ... 2,0 [10]; 1,5 ... 2,5 [11].

В данном случае процесс пневмотранспорта усложняется тем, что одновременно с транспортированием происходит химическая реакция разложения дигидрата сульфата кальция с превращением его в полугидрат. В результате реакции выделяется газ, который увеличивает количество газового потока. Поэтому для установки по дегидратации гипса в потоке теплоносителя неизвестно точное значение коэффициента  $k$ , которое бы позволяло рассчитывать минимально необходимую скорость газового потока для подъема и транспортирования частиц гипса с одновременным преобразованием дигидрата в полугидрат. Чтобы определить коэффициент  $k$  на входе в рабочую зону установки, были проведены экспериментальные исследования на лабораторной модели установки. Параметры материала и теплоносителя были такими же, которые брались для расчёта скорости витания. Определялась скорость газового потока, при которой начинается транспортирование частиц материала. В результате она составила 6,765 м/с.

Тогда, усредняя значение скорости витания, рассчитанное по формулам 1, 2 и 8 (табл. 1), находим коэффициент запаса  $k$ :

$$k = \frac{6,765}{(1,168 + 1,157 + 1,142)/3} \approx 5,854.$$

Определённый коэффициент  $k$  позволяет рассчитывать с помощью выражения (30) минимально необходимую скорость теплоносителя для транс-

портирования гипсовых частиц, поступающих на дегидратацию.

### **Выводы:**

1. Рассмотрены и раскрыты существующие формулы для определения скорости витания частиц материала.
2. Выделены те формулы, которые наиболее целесообразно использовать при пневмотранспорте гипсовых частиц в потоке теплоносителя.
3. Найден коэффициент, позволяющий рассчитывать минимально необходимое значение скорости газового потока для транспортирования частиц гипса, поступающих на дегидратацию.

**Список литературы:** 1. *Зайончковский Я.* Обеспыливание в промышленности. – М.: Стройиздат, 1969. – 352 с. 2. *Давитулиани В.В., Булкин В.А.* Псевдоожижение и аппараты с кипящим слоем. – Казань, 1974. 3. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с. 4. *Альтиуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П.* Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с., ил. 5. *Ахундов А.А., Петрихина Г.А., Полинковская А.И., Пржецлавский В.Л.* Обжиг в кипящем слое в производстве строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1975. – 248 с., ил. 6. *Лебедев П.Д., Шукин А.А.* Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1970. 7. *Дэвидсон И.Ф., Харрисон Д.* Псевдоожижение твёрдых частиц. – М.: Химия, 1965. – 184 с. 8. *Лыков М.В.* Сушка в химической промышленности. – М.: 1970. 9. *Романков П.Г., Раишковская Н.Б.* Сушка во взвешенном состоянии. – Л.: Химия, 1979. – 272 с. 10. *Доманский И.В., Исаков В.П., Островой Г.М. и др.* Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи. Под общ. ред. В.Н. Соколова – С-Пб.: Политехника, 1992. – 327с. 11. *Теплотехнический справочник.* В 2-х т. Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. М.: Энергия, 1975.

*Поступила в редколлегию 11.09.08*